基于多孔介质模型的养殖网箱周围流场特性研究

刘春宏[1],刘长根[1],董娇娇[1],徐晓甫[2],崔映雪[1]

(1. 天津大学机械工程学院,300350 天津;2. 天津渤海水产研究所,300457 天津)

摘　要: 为探讨鱼类养殖网箱对周围海域流场的影响,基于雷诺时均方程和 Realizable k-ε 湍流模型,耦合多孔介质模型,建立了研究鱼类养殖网箱周围流场的三维水动力模型。根据典型养殖场的实际数据,分别对仅网衣作用、仅鱼类作用及网衣和鱼类共同作用下网箱周围流场进行数值模拟。结果表明综合考虑网衣和鱼类的作用时,网箱下游流速衰减最大可达 85%,流速约在 6.5 倍网箱直径处逐渐恢复;与仅鱼类作用和仅网衣作用相比,网箱内部及下游流速衰减程度明显增强,说明单独只考虑鱼或网都不能准确地描述鱼类养殖网箱周围的流场特性,须将二者结合考虑。

关键词: 养殖网箱;多孔介质;流速衰减

中图分类号: O352　　　　**文献标志码:** A

Characteristics of flow field around fish cages based on the porous media model

LIU Chunhong[1], LIU Changgen[1], DONG Jiaojiao[1], XU Xiaofu[2], CUI Yingxue[1]

(1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 300350 Tianjin, China;
2. Tianjin Bohai Fisheries Research Institute, 300457 Tianjin, China)

Abstract: In order to explore the influence of fish cages on the flow field in the aquaculture area, based on the Reynolds time-average equation and Realizable k-ε turbulence model, coupled with the porous media model, a three-dimensional hydrodynamic model was established to study the flow field around fish cages. Three working conditions were carried out, namely, only the net effect, only the fish effect, and the combined effect of the net and the fish. The results show that when considering the effects of the net and the fish, the attenuation of the flow velocity inside and downstream of the cage is significantly enhanced, and the downstream flow velocity attenuation of the cage can reach a maximum of 85%, and the starting position of the corresponding velocity recovery is about 6.5 times the diameter of the cage. Neither considering the fish or the net alone can accurately describe the characteristics of the flow field around fish cages, and the two factors must be considered together. The results of numerical simulation can provide generalized parameters for studies on the overall impact of aquaculture on the bay dynamics and further studies on the impact of aquaculture activities on water quality and environment.

Key words: culture cage; porous medium model; velocity attenuation

收稿日期: 2020-08-25　　　　**修回日期:** 2021-12-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFA0600901;2018YFD0900704);天津市互联网跨界融合创新科技重大专项资助项目(No. 18ZXRHSF00270);天津大学自主创新基金资助项目(No. 2020XZC-0097)

通信作者: 刘长根,副教授,博士。E-mail: lchg@tju.edu.cn

引用格式: 刘春宏,刘长根,董娇娇,等. 基于多孔介质模型的养殖网箱周围流场特性研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):176-185.
LIU Chunhong, LIU Changgen, DONG Jiaojiao, et al. Characteristics of flow field around fish cages based on the porous media model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1):176-185.

近年来,海水网箱养殖创造了巨大的经济效益;但大量的网箱聚集在近岸海域和半封闭海湾[1]会对养殖区的水流起到阻碍作用,降低养殖区内水流流速[2],从而引起养殖区内部与外部的水体交换变差,致使养殖区内水环境恶化,病害频繁发生,养殖鱼类大量死亡[3]。因而研究养殖网箱的减流效应有利于网箱养殖的可持续发展。

网衣系统是网箱最为重要的结构之一,属于柔性小尺度、多孔结构,且网箱中的养殖鱼类数量多且具有自主游动能力,同时受养殖活动以及环境的影响。这使得研究鱼类养殖网箱周围流场的影响十分困难,且大多集中在现场监测和物理模型试验上。王辉荣[4]通过对湄洲湾、罗源湾和三沙湾网箱养殖区的实测数据的分析,得出了养殖区内海水基本呈停滞状态的结论。Johansson 等[5]在挪威的 4 个大西洋鲑鱼网箱养殖区进行了实地监测,实测数据表明网箱内部流速降低了 33% ~64%。Gansel 等[6]通过物理模型试验和现场试验研究了空网箱和有鱼网箱内外流场特性,结果表明相比于空网箱,有鱼网箱会在网箱下游造成更大的流速衰减。Plew 等[7]研究了大西洋鲑鱼对圆形水槽中水流的影响,结果发现高养殖密度下水槽平均流速降低了 57%。毕春伟等[8]通过水槽试验研究鲤鱼幼鱼对网箱周围水动力特性的影响,结果表明对于两个串联网箱,来流速度越大,鱼群对网箱流速的影响越大。数值模拟方面,Tang 等[9]利用计算流体动力学模型探究了养殖鱼类不同群体结构、游泳速度、分布和放养密度对网箱周围流动动力学的影响。由于网箱的配重系统和锚定系统起到固定网箱的作用,在纯水流作用时可忽略网衣变形影响,将网衣看作一个整体,利用多孔介质模型进行数值模拟。目前已有较多的研究证明多孔介质模型可以精确地模拟单片网衣、空网箱周围流场特性[10-12],采用多孔介质模型可以在保证网箱尾流流场计算可靠性的基础上提高计算效率。

由于网箱中的养殖鱼数量庞大,且具有游泳能力和独特的生活习性,考虑养殖鱼的实时分布特征及游泳状态,用数值模拟的方法研究养殖鱼对网箱周围的流场实时影响显然是不现实的,而一个海水养殖场大规模的养殖行为,养殖鱼对水体的阻力显然不能忽略。从统计学意义上,可以认为养殖鱼在特定的时间和空间是均匀分布的。Gansel 等[6]通过实地监测发现网箱中养殖鱼的垂向分布有一定的规律,因此本文考虑养殖鱼在网箱中的垂向分布,将养殖鱼覆盖区域视为多孔介质区域,利用多孔介质模型进行模拟计算。

本文基于 Ansys Fluent 平台,视网箱网衣以及鱼类网箱内部为多孔介质,建立了研究鱼类养殖网箱周围流场的三维水动力学模型。在验证多孔介质模型适用性的基础上,分别探究了网箱网衣、鱼类以及二者共同作用三种情况下网箱周围的流速分布规律。单体鱼类养殖网箱周围流场的数值模拟可为网箱养殖海域水动力模型的建立提供参数支持,有利于进一步评估养殖容量以及优化养殖布局。

1 数学模型

1.1 控制方程

本文基于雷诺时均方程和 Realizable k-ε 模型,耦合多孔介质模型对网箱周围流场进行求解,基本方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \tag{2}$$

式中:ρ 为流体密度;t 为时间;x_i 为空间坐标;u_i、u_j 为流体速度分量;p 为压强;u_i'、u_j' 为速度分量的脉动值;$i,j=1,2,3$ 表示坐标分量;μ 为动力黏度;S_i 为动量方程的源项。多孔介质外部 $S_i=0$,多孔介质内部动量方程的源项[12]为

$$S_i=-\left(\boldsymbol{D}_{ij}\mu u_j+\boldsymbol{C}_{ij}\frac{1}{2}\rho|u|u_j\right) \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{D}_{ij}$、$\boldsymbol{C}_{ij}$为多孔介质系数矩阵,可表示为

$$\boldsymbol{D}_{ij}=\begin{bmatrix}D_n & 0 & 0\\ 0 & D_l & 0\\ 0 & 0 & D_l\end{bmatrix},\boldsymbol{C}_{ij}=\begin{bmatrix}C_n & 0 & 0\\ 0 & C_l & 0\\ 0 & 0 & C_l\end{bmatrix}$$

式中:D_n为法向黏性阻力系数;D_l为切向黏性阻力系数;C_n为法向惯性阻力系数;C_l为切向惯性阻力系数。

由于网衣和鱼的阻水作用,网箱前后存在较大的压强梯度,网箱附近的水流运动变化会较为激烈,Realizable k-ε 湍流模型可以较好地处理流速变化较大的流动,且具有较好的通用性[13];因此本文选用 Realizable k-ε 湍流模型进行计算。

1.2 多孔介质阻力系数计算

1.2.1 鱼类阻力系数计算

由于网箱中的鱼数量多且分布受行为习性及养殖活动影响，数值模拟困难大；因此将网箱中的鱼看作一个整体，以网箱中的体积占网箱相应空间体积的比值确定多孔介质模型的孔隙率，将网箱内部视为多孔介质区域，实现养殖鱼对网箱周围流场影响，如图 1 所示。

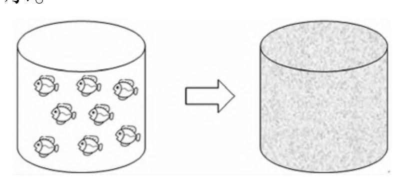


图 1 鱼类网箱简化为多孔介质模型示意图

Fig. 1 Sketch of porous media model

将鱼视为简单均匀的多孔介质，其阻力系数可由 Ergun 公式[14]得到，即

$$\begin{cases} D_n = D_l = \dfrac{150(1-e)^2}{D_p^2 \quad e^3} \\ C_n = C_l = \dfrac{3.5(1-e)}{D_p \quad e^3} \end{cases} \tag{4}$$

式中：D_p 为多孔介质的粒径，由养殖鱼的体积决定；$e = 1-\phi$，e 为孔隙率，ϕ 为鱼的体积分数，由网箱中的鱼的体积占网箱相应空间体积的比值确定。

1.2.2 网衣阻力系数计算

Patursson 等[10]利用 8 片网衣对全尺寸单体网箱周围流场进行数值模拟，网箱下游流速模拟结果与实测数据吻合较好。为更好地还原圆柱形网箱形状特点以及考虑计算效率，在不考虑网衣的变形的情况下，本文将网箱视为由沿圆周均匀分布的 12 片网衣组成，通过对不同冲角下各个平面网衣模型多孔介质系数的设置，实现对单体网箱的数值模拟。网箱简化模型如图 2 所示。

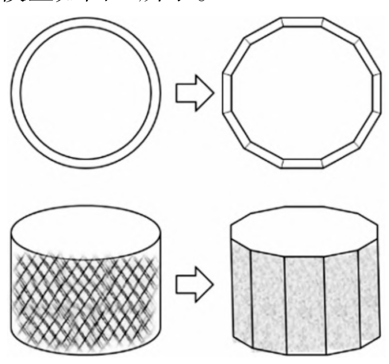


图 2 网箱简化为多孔介质模型示意图

Fig. 2 Sketch of porous media model

Patursson 等[10]采用最小二乘法，根据模型试验结果中的流速与阻力的关系及经验公式，给出了网衣与水流方向垂直时，多孔介质系数的关系式为

$$\begin{cases} D_n = 1.11 \times 10^7 S_{net}^3 + 2.26 \times 10^6 S_{net}^2 \\ D_l = 3.97 \times 10^5 S_{net}^2 + 1.33 \times 10^6 S_{net} \\ C_n = 70.2 S_{net}^2 + 13.2 S_{net} \\ C_l = 31.9 S_{net}^2 + 6.93 S_{net} \end{cases} \tag{5}$$

式中：S_{net} 为网衣密实度；$S_{net} = 2d/a$，d 为网线直径，a 为目脚长度。

如图 3 所示，网衣与水流成一定冲角 α。此时，可将多孔介质系数按照如下公式进行变换[15]。

$$\begin{cases} D'_n = \dfrac{D_n + D_l}{2} + \dfrac{D_n - D_l}{2}\cos(2\alpha') \\ C'_n = \dfrac{C_n + C_l}{2} + \dfrac{C_n - C_l}{2}\cos(2\alpha') \\ D'_l = \dfrac{D_n - D_l}{2}\sin(2\alpha') \\ C'_l = \dfrac{C_n - C_l}{2}\sin(2\alpha') \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\alpha' = 90° - \alpha$；D'_n、C'_n、D'_l、C'_l 为变换后的多孔介质系数。

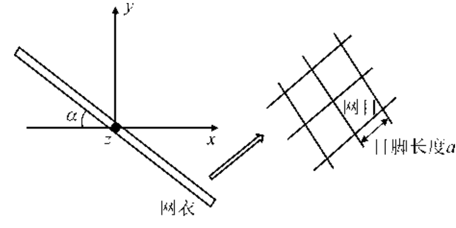


图 3 网衣冲角示意图

Fig. 3 Sketch of netting attack angle

1.3 边界条件及数值计算方法

数值模拟中，入口采用速度进口边界条件，出口采用自由出流边界条件，数值水槽侧壁采用对称边界条件，底面采用无滑移固壁边界条件，顶面采用剪切应力为 0 的固壁边界条件，多孔介质区域边界条件设置为多孔阶跃边界条件。采用有限体积法离散控制方程，离散格式采用二阶迎风格式，压力-速度耦合选择 SIMPLE 算法。

1.4 模型验证

利用 Patursson[16]的单片网衣的试验结果对网衣模型进行验证，如图 4 所示。试验水槽长 37 m，宽 3.66 m，深 2.44 m；试验网衣为 1 m × 1 m 的无结节

尼龙网，网线直径为 2.8 mm，目脚长度为 0.029 m。网衣由钢架固定在水槽中央，位于水面以下 0.73 m 位置处，以减少网衣前后压力差产生的表面波影响；钢架可绕铅垂轴旋转，使网衣与水流方向形成不同冲角。数值模拟的计算域与试验水槽一致，按照网衣冲角 α 为 30°、45°、60°和 90°四种工况进行模拟，将网衣视为多孔介质区域。文献[8-9]研究表明多孔介质厚度 λ 分别取 0.005 m、0.01 m 和 0.05 m 时均不会影响网衣下游的流速衰减，故本文多孔介质区域厚度取 0.05 m 进行数值模拟。经计算可得网衣密实度 S_{net} 为 0.198。x、y 和 z 轴分别代表流向、横向和垂向，入口为均匀来流，速度为 U_0 = 0.5 m/s。

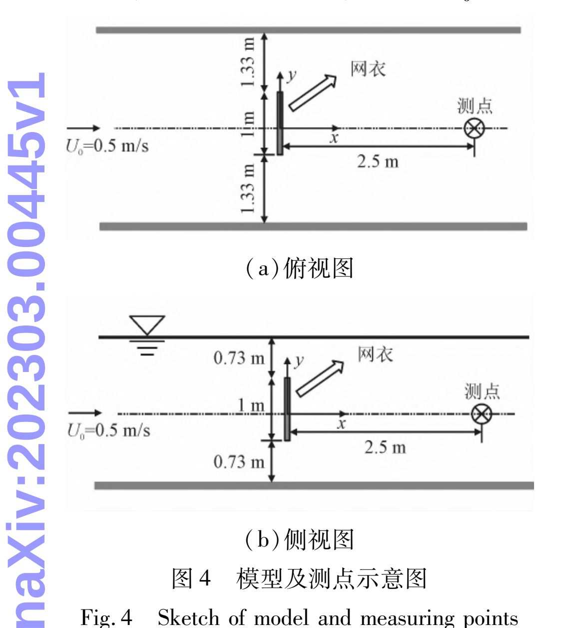


图 4　模型及测点示意图

Fig. 4　Sketch of model and measuring points

提取不同冲角时网衣中心后 2.5 m 处的流速 $U_{2.5}$，计算网衣的阻力系数 C_D 和升力系数 C_L，模拟结果与试验结果对比如图 5 所示。可以看出，模拟结果与试验结果总体上吻合较好。这说明多孔介质模型可以用于分析网衣以及网箱周围的流场特性。

网箱中的鱼、河道中的挺水植被等都会对水流起到阻碍作用。当不考虑个体之间的相互作用，将其看成一个整体，着重关注尾流的水动力特征时，可将网箱中的鱼、植被等整体视为多孔介质区域，将流动区域中这些固体的作用近似看作附加在流体上的分布阻力进行模拟[13]。目前已有较多研究表明多孔介质模型可以精确地模拟植被下游的尾流特征[17-21]。本文利用文献[22]的挺水植被试验结果对养殖鱼类多孔介质模型进行验证。如图 6 所示，试验水槽长 13 m，宽 1.2 m，深 0.133 m；40 棵挺水植物交错排列形成一个直径 D 为 0.22 m 的圆形阵列，植被带中心位于水槽中轴线上，高度与水槽相同，单棵植株直径 d 为 0.006 m。本文计算域与试验水槽一致，植被区域视为多孔介质区域。计算得到植物固体体积分数为 0.03，入口流速为 U_0 = 0.098 m/s。

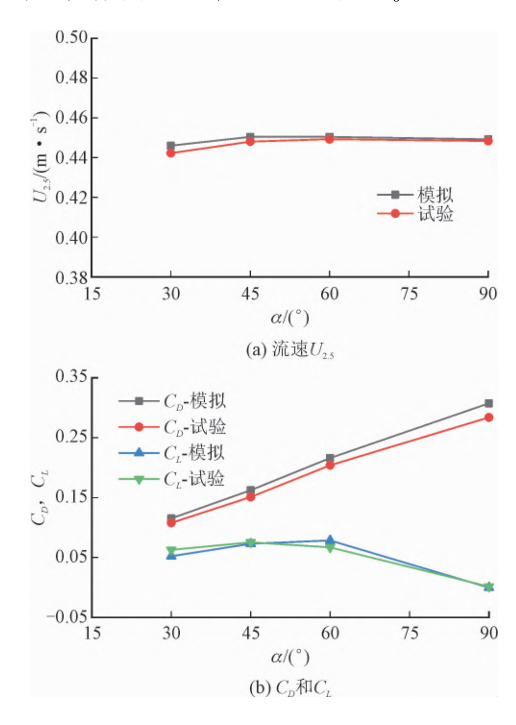


图 5　网衣的阻力系数和升力系数

Fig. 5　Drag coefficient and lift coefficient of netting

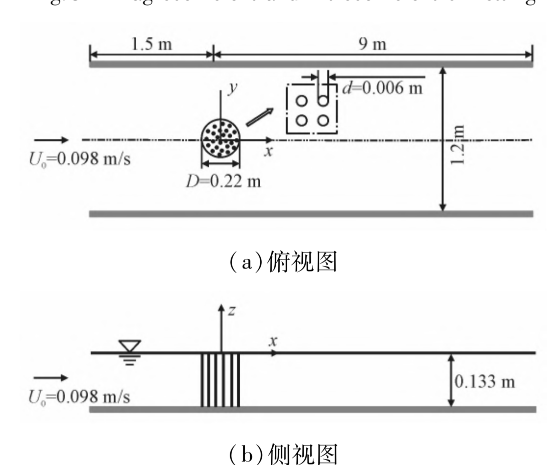


图 6　平面计算域及模型示意图

Fig. 6　Sketch of plane computing domain and model

提取沿流向方向的流速 $U(y = 0, z/H = 0.5)$ 和沿横向方向的流速 $V(y = D/2, z/H = 0.5)$ 的变化曲线与试验结果进行对比，结果如图 7 所示。可以看出，数值模拟结果与试验值较为吻合；流速 U 均方根误差为 1.37%，流速 V 均方根误差为 0.79%。可认为多孔介质模型能够较好地描述多孔介质下游的流场结构和尾流特征。

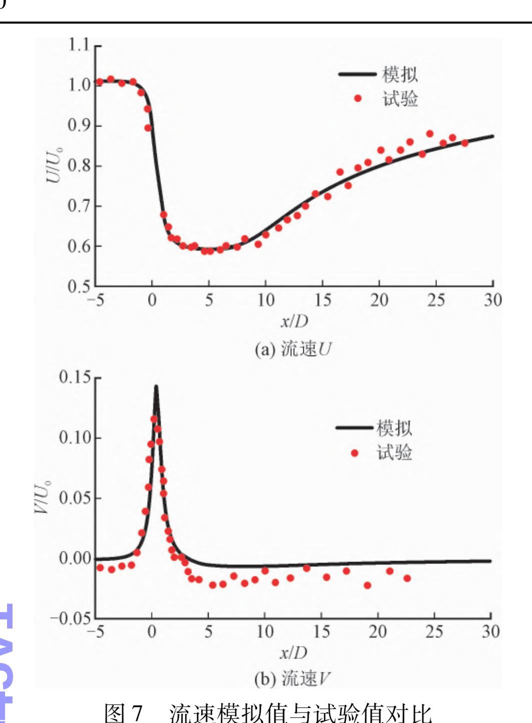


图 7 流速模拟值与试验值对比

Fig. 7 Comparisons of velocities between numerical and experimental data

2 养殖网箱周围流场数值模拟

根据海南某典型养殖场实际调查资料，直径 D 为 19 m，高度 H 为 8 m 的圆形网箱，养鱼数量约 10 万尾，6 月份单条鱼的抽样体重均值为 0.125 kg。经计算得整个网箱中鱼的体积分数 ϕ 为 0.22%。使用的网衣网线直径为 2.8 mm，目脚长度为 0.029 m，经计算得网衣的密实度 S_{net} 为 0.2。数值水槽长 513 m，宽 95 m，深 16 m。网箱位于水槽中央，网箱中心距离速度入口 38 m。网格类型采用非结构化四面体网格，将网衣多孔介质区域按照最小网格尺寸划分网格，再将其周围的网格以向内 1.1 倍和向外 1.2 倍的增长比率逐渐增大，同时设置最大网格尺寸作为网格尺寸的阈值。通过网格无关性检验后，最终选用最小网格尺寸为 0.025 m 的网格进行计算，局部网格划分如图 8 所示。图中：x、y 和 z 轴分别代表流向、横向和垂向；红色虚线圈表示网箱位置。入口为来流速度 U_0 = 0.5 m/s。

2.1 仅鱼类作用时网箱周围流场特性研究

当养殖鱼分布在整个网箱内部时，网箱周围流速分布如图 9 所示。图中黑色点画线区域表示网箱位置。由图 9 中(a)和(c)可以看出，由于养殖鱼对水流的阻碍作用，网箱前有小范围的流速衰减区域；网箱后流速衰减区域范围较大，且流速骤降区域宽度逐渐变窄；网箱两侧及底部水流流速相应增大。这是由于网箱中的鱼的阻水作用，水流会在网箱附近发生绕流，产生横向流动和垂向流动，从而网箱两侧及底部水流的流向发生明显偏转。这与 Gansel 等[6] 观测的试验现象一致。由图 9 中(b)和(d)可以看出，网箱内部水流会发生横向和垂向流动，产生横向的流速 V 和垂向的流速 W；横向流速 V 在两侧达到最大值 0.1 m/s，为来流速度 U_0 的 20%；垂向流速 W 在网箱下侧达到最大，为 0.075 m/s，为来流速度 U_0 的 15%。

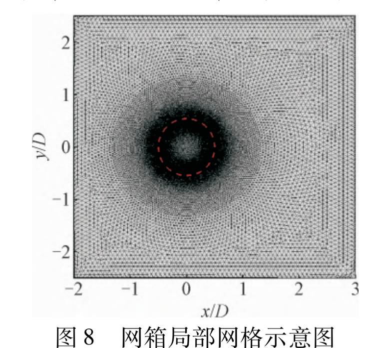


图 8 网箱局部网格示意图

Fig. 8 Sketch of part meshing of net cage

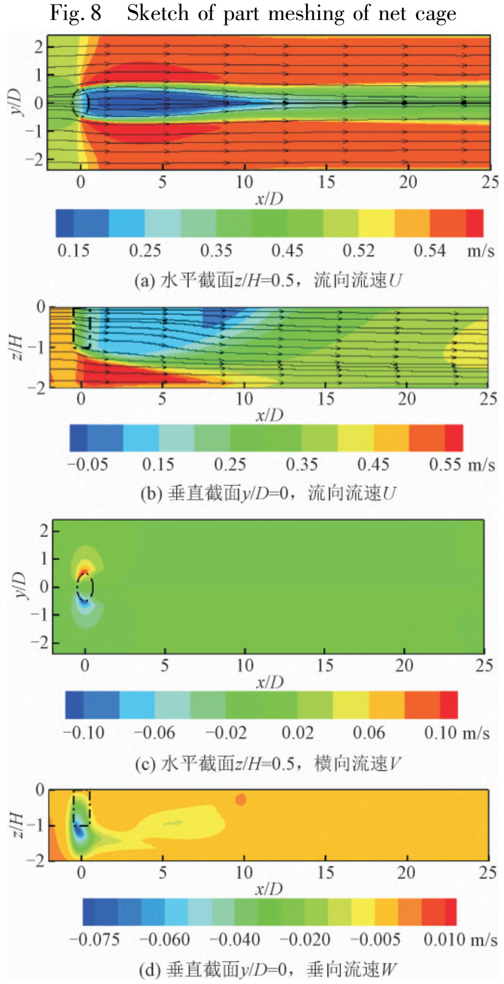


图 9 网箱周围流速分布

Fig. 9 Flow velocity distribution around the cage

流向流速 U 的变化曲线如图 10 所示。可以看出:沿 x 方向,网箱下游流速先减小,后逐渐恢复至稳定值;由网箱中心($y/D=0,z/H=-0.5$)向上侧($y/D=0.25,z/H=-0.5;y/D=0.5,z/H=-0.5$)靠近时,流速恢复的起始位置越来越接近网箱,流速衰减程度也越来越小;穿过网箱中心沿 x 方向流向流速衰减最大,流速衰减可达80%,约在8 倍网箱直径处流速开始恢复。沿 y 方向,流速呈现网箱中间低,两侧高的趋势;在流向流速恢复之前($x/D=5,z/H=-0.5$),横向方向流速衰减区域宽度明显大于网箱直径;在流向流速沿 x 方向恢复之后($x/D=10,15,20$),尾流区横截面上流向流速会在网箱边缘处恢复成来流速度 U_0 并向两侧逐渐增大至 1.09 倍来流速度。沿 z 方向,网箱底部流速约为($1.02\sim1.11$)U_0,比来流速度大 2% ~11%。

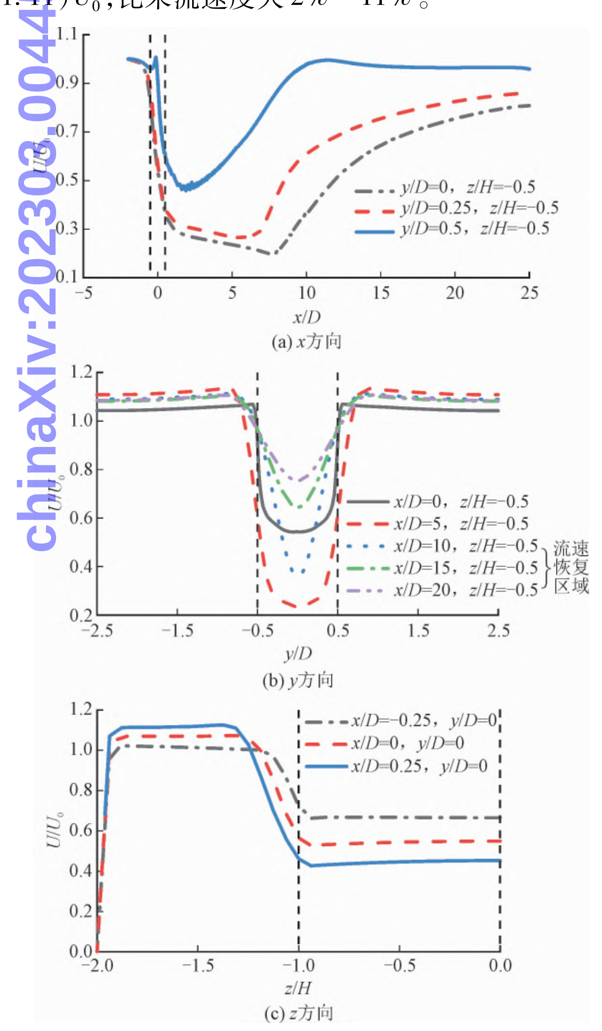


图 10 流向流速 U 沿不同方的向变化趋势

Fig. 10 Variation trend of flow velocity U along different directions

Gansel 等[6]通过实地监测发现网箱中养殖鱼类在垂向分布上有明显的日变化现象,即白天鱼群多集中在网箱中下部,晚上多集中在网箱中上部。当鱼群集中分布在网箱中上部或者中下部时,$\phi=0.33\%$。考虑养殖鱼类在垂向分布特点对流场的影响,对养殖鱼分别集中分布在网箱中上部分布和在网箱中下部分布两种工况进行数值模拟,结果如图 11 所示。图中黑色点画线区域表示网箱位置。穿过网箱中心提取沿 z 方向流向流速 U 的变化曲线如图 12 所示。对比图 9(c)和图 11 可以看出,当养殖鱼类集中分布在中上部或者中下部时,由于鱼群的体积不变,覆盖区域变小,因而鱼的体积分数会相对增大,给水流造成更大的阻力,水流的垂向运动加剧,在网箱下游产生小尺度涡旋。

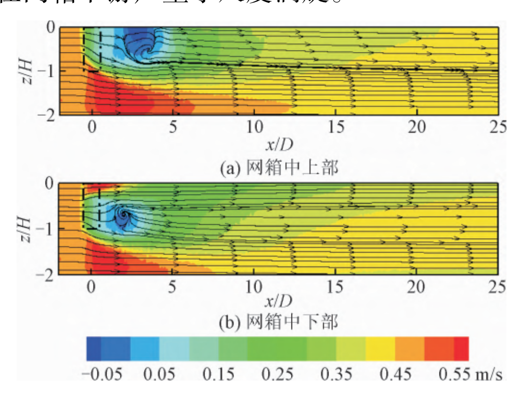


图 11 垂直截面网箱周围流速分布

Fig. 11 Flow velocity distribution around the cage at vertical section

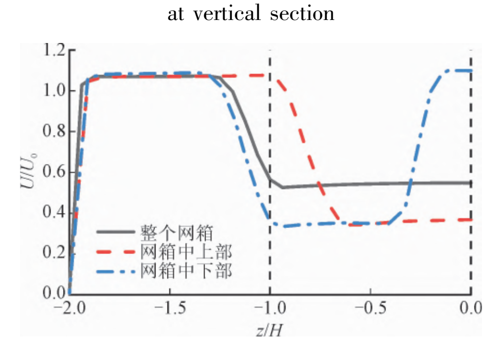


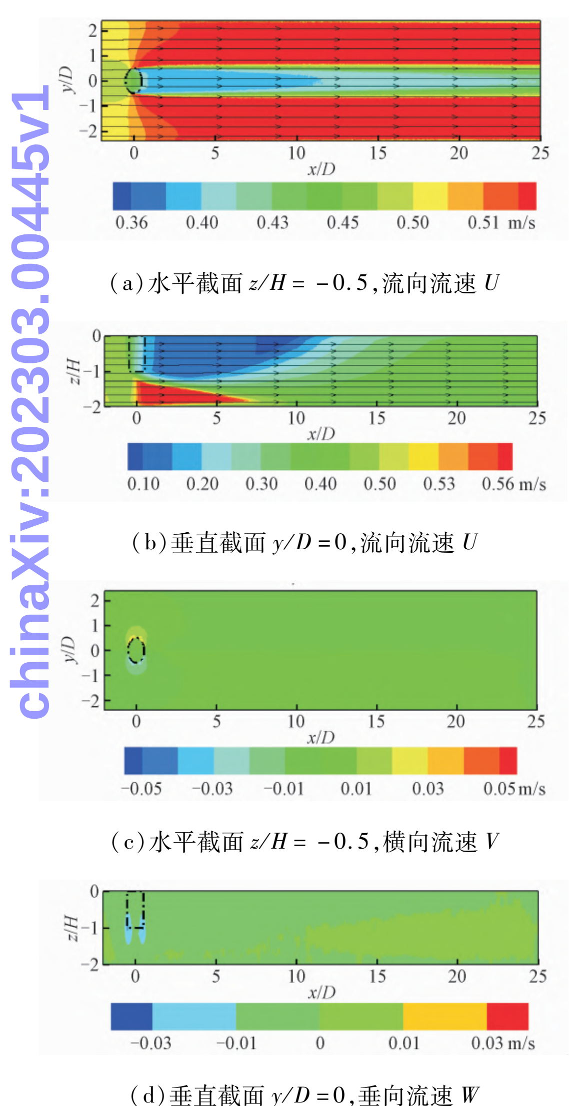
图 12 流向流速 U 沿 z 方向变化趋势

Fig. 12 Variation trend of flow velocity U along z direction

由图 12 可以看出:鱼群集中分布在中上部时,流速 U 在网箱下部时已开始恢复,并在网箱底部时恢复成稳定流速 1.07 U_0;当鱼群分布在中下部时,由于鱼群的阻水作用,网箱上部水流流速明显增大,可达 1.08 U_0,在网箱下游流速 U 恢复位置也相对于分布在整个网箱时远离网箱。

2.2 仅网衣作用

图 13 为仅网衣作用时网箱周围的流速分布。图中黑色点画线区域表示网箱位置。由图 13 中(a)和(b)可以看出,由于网衣的阻水作用,同样在网箱前有小范围的流速衰减区域;网箱后流速衰减区域范围较大,且流速衰减区域宽度大致与网箱直径相同;网箱两侧及底部水流流速相应增大;由流线可以看出水流方向始终保持与入口流向相同,说明网衣的阻水效应并不会引起网箱下游及底部水流流向发生变化。



(a) 水平截面 $z/H=-0.5$,流向流速 U

(b) 垂直截面 $y/D=0$,流向流速 U

(c) 水平截面 $z/H=-0.5$,横向流速 V

(d) 垂直截面 $y/D=0$,垂向流速 W

图 13 网箱周围流速分布

Fig. 13 Flow velocity distribution around the cage

由图 13 中(c)和(d)可以看出,网衣内部水流会发生横向和垂向流动,产生横向的流速 V 和垂向的流速 W;横向流速 V 在两侧达到最大值 0.05 m/s,为来流速度 U_0 的 10%;垂向流速 W 在网箱下侧达到最大,为 0.03 m/s,为来流速度 U_0 的 6%。

流向流速 U 变化曲线如图 14 所示。可以看出:沿 x 方向,网箱边缘处($y/D=0.5$,$z/H=-0.5$)流速 U 变化剧烈,尾流流速减小后迅速开始恢复;穿过网箱中心,流速先减小至 0.78 倍来流速度,并于 2.5 倍网箱直径处流速开始恢复。沿 y 方向,网箱中心流速衰减可达 10%;网箱尾流区处于流速衰减区域时($x/D=1$,$z/H=-0.5$);网箱内部尾流区流速先逐渐恢复,后趋于稳定值 $0.8U_0$,而网箱尾流区处于流速恢复区域时($x/D=10,20$);横截面上流速呈现逐渐减小后趋于稳定值。沿 z 方向,网箱底部流速约为$(1.01\sim1.03)U_0$,比来流速度大 1%~3%。

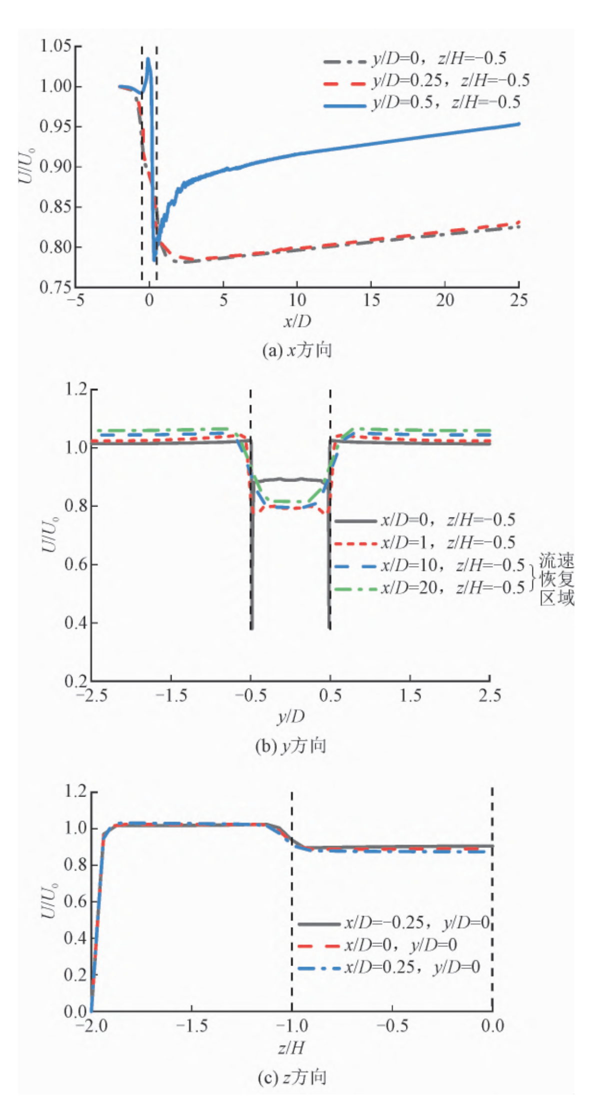
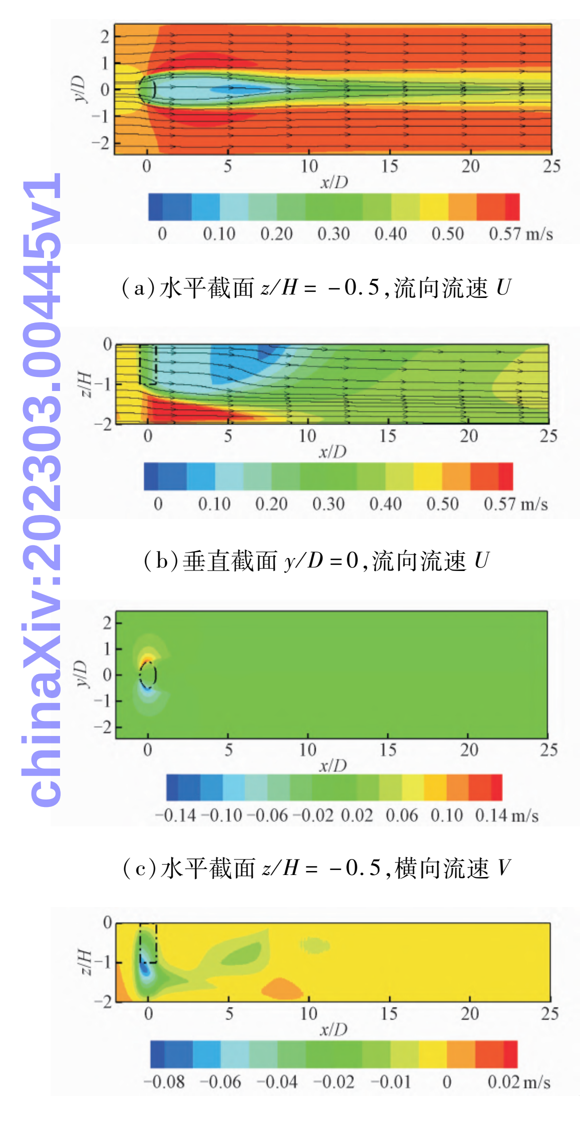


图 14 流向流速 U 沿不同方向变化趋势

Fig. 14 Variation trend of flow velocity U along different directions

2.3 鱼类和网衣共同作用

鱼类和网箱共同作用时，养殖网箱周围流速等线图如图 15 所示。图中黑色点画线区域表示网箱位置。可以看出：其流场特征与只有鱼类作用时相似，但网箱内部和下游流速衰减程度明显增强；网箱内部水流的横向和垂向流动更为明显，横向流速 V 最大值为 0.14 m/s，为来流速度 U_0 的 28%，垂向流速 W 最大值为 0.08 m/s，为来流速度 U_0 的 16%。



(a) 水平截面 $z/H=-0.5$，流向流速 U

(b) 垂直截面 $y/D=0$，流向流速 U

(c) 水平截面 $z/H=-0.5$，横向流速 V

(d) 垂直截面 $y/D=0$，垂向流速 W

图 15 网箱周围流速分布

Fig. 15 Flow velocity distribution around the cage

取穿过网箱中心流向流速 U 变化曲线与相应的只有鱼作用和只有网衣作用进行对比，结果如图 16 所示。可以看出：考虑鱼和网共同作用时流速分量 U 变化趋势与只考虑鱼时类似，但网箱内部和下游流速明显比仅考虑鱼和仅考虑网时低，网箱下游流速衰减可达 85%；相应流速恢复的起始位置会靠近网箱，约为 6.5 倍网箱直径处；相比于只有鱼类作用时，网箱下游流速增长并不明显，但流速恢复的起始位置略远离网箱底部。这说明单独只考虑域或网都不能准确的描述鱼类网箱周围流场，需要综合考虑鱼和网衣的作用，且在本文研究的密实度和鱼体积分数情况下，鱼对水的减流作用明显大于网衣。

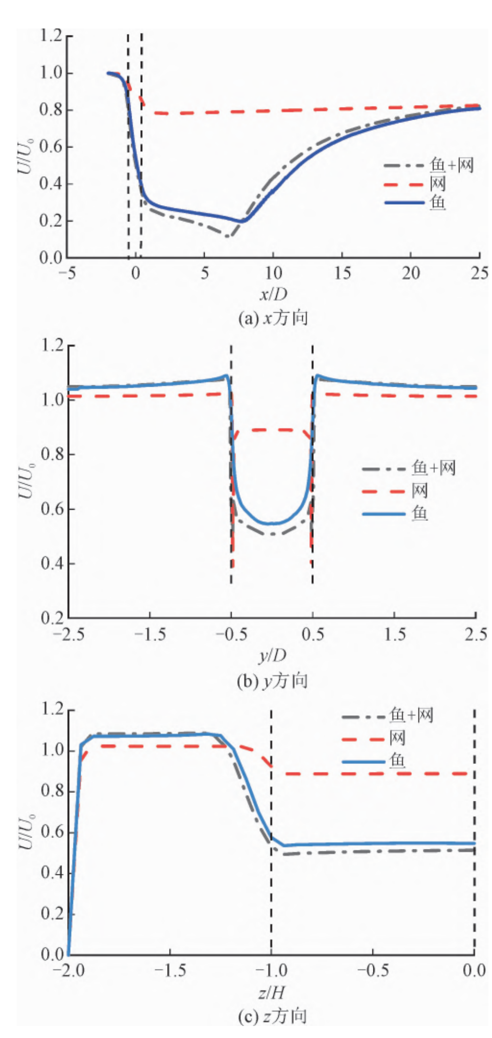


图 16 穿过网箱中心流向流速 U 变化趋势

Fig. 16 Variation trend of flow velocity changes across the center of the net cage

3 结 论

本文基于多孔介质模型，建立了研究鱼类养殖网箱周围流场的三维水动力模型，分别对仅网衣作用、仅鱼类作用和二者共同作用 3 种情况对鱼类网箱周围水动力场进行了模拟，分析了网箱周围及尾

流特性,得到结论如下:

1)多孔介质模型能够准确地模拟大尺度鱼类养殖网箱周围的流场特性。

2)在只有网衣作用、网衣密实度 $S_{net}=0.2$ 情况下,网箱周围流场水流流向不发生明显改变,横向流速 V 和垂向流速 W 在网箱周围达到最大,最大值分别为来流速度的 10% 和 6%;网箱中心流速衰减可达 10%,网箱下游流速先减小后逐渐增大,最大流速衰减约 22%,并于 2.5 倍网箱直径处流速开始恢复;网箱底部水流流速相应增大,约比来流速度增加 1% ~3%。

3)在只有鱼类作用、鱼的体积分数 $\phi=0.22\%$ 情况下,由于网箱中的鱼的阻水效应,网箱周围及下游水流流向会发生明显偏转,且网箱内部水流会发生横向和垂向运动,在网箱周围横向流速 V 和垂向流速 W 会达到最大值,最大值分别为来流速度的 20% 和 15%;网箱下游流向流速先减小后逐渐恢复至稳定值,流速衰减最大可达 80%,并约在 8 倍网箱直径处流速开始恢复;网箱底部水流流速相应增大,约比来流速度增加 2% ~11%。考虑养殖鱼类在垂向分布特点时发现,当鱼群集中分布在网箱中上部或者中下部时,网箱下游会有小尺度涡环产生。由于鱼群的体积不变,覆盖区域变小,因而鱼的体积分数会相对增大,给水流造成更大的阻力,网箱下游流速衰减更剧烈。

4)在鱼和网衣共同作用时,流场分布特征与只有鱼类作用时类似。但经过对比可以看出,网箱内部及下游流速衰减程度明显增强,网箱下游流速衰减最大可达 85%,相应流速恢复的起始位置会靠近网箱,约为 6.5 倍网箱直径处。通过对比可以说明单独考虑鱼或者网衣作用均不能准确描述鱼类网箱周围流场特性,需要将二者结合考虑。

参考文献

[1] 石建高,王鲁民,徐君卓,等. 深水网箱选址初步研究[J]. 现代渔业信息,2008,23(2):9-12.(SHI Jiangao, WANG Lumin, XU Junzhuo, et al. Preliminary study on the site selection of deep water net cage[J]. Modern fisheries information, 2008, 23(2):9-12(in Chinese)).

[2] GRANT J, BACHER C. A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay[J]. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 2001, 58(5):1003-1011.

[3] 姜欢欢. 网箱养殖对近岸海域海洋生态环境的影响探讨[J]. 海洋开发与管理,2015,32(8):111-114.(JIANG Huanhuan. Discussion on the influence of cage culture on marine ecological environment in coastal waters[J]. Ocean development and management, 2015, 32(8):111-114(in Chinese)).

[4] 王辉荣. 网箱养殖区海流观测[J]. 福建水产,2006,28(2):98-100.(WANG Huirong. Ocean current observation in cage culture area[J]. Journal of Fujian fisheries, 2006, 28(2):98-100(in Chinese)).

[5] JOHANSSON D, JUELL J E, DE OPPEDAL F, et al. The influence of the pycnocline and cage resistance on current flow, oxygen flux and swimming behaviour of Atlantic salmon (Salmo salar L.) in production cages[J]. Aquaculture, 2007, 265(1):271-287.

[6] GANSEL L C, RACKEBRANDT S, OPPEDAL F, et al. Flow fields inside stocked fish cages and the near environment[J]. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 2014, 136(3):031201.

[7] PLEW D R, KLEBERT P, ROSTEN T W, et al. Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank[J]. Journal of hydraulic research, 2015, 53(3):364-383.

[8] BI C W, ZHAO Y P, DONG G H. Experimental study on the effects of farmed fish on the hydrodynamic characteristics of the net cage[J]. Aquaculture, 2020, 524:735239.

[9] TANG M F, XU T J, DONG G H, et al. Numerical simulation of the effects of fish behavior on flow dynamics around net cage[J]. Applied ocean research, 2017, 64:258-280.

[10] PATURSSON OYSTEIN. Flow through and around fish farming nets[D]. Durham: University of New Hampshire, 2008.

[11] 赵云鹏,刘兴,董国海. 单片网衣周围流场特性的数值模拟[J]. 中国科技论文在线,2010,5(7):557-562.(ZHAO Yunpeng, LIU Xing, DONG Guohai. Numerical simulation of the flow fields around fishing net[J]. Sciencepaper online, 2010, 5(7):557-562(in Chinese)).

[12] ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, et al. Numerical simulation of the flow field inside and around gravity cages[J]. Aquacultural engineering, 2013, 52:1-13.

[13] ANSYS. Ansys fluent user's guide 19[M]. Pittsburgh: Ansys Incorporated, 2010.

[14] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemicalengineering progress, 1952, 48(2):89-94.

[15] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: America Elsevier Publishing Company Incorporated, 1972.

[16] PATURSSON O. Tow tank measurements of drag and lift force on a net panel and current reduction behind the net panel [R]. New Hampshire, USA: Technical Report NVDRit, 2007.

[17] YU L H, ZHAN J M, LI Y S. Numerical simulation of flow through circular array of cylinders using multi-body and porous models[J].

Coastal engineering journal,2014,56(3):1450014.

[18] 刘彦东,徐国宾,张雅卓. 含柔性沉水植物河道水力特性三维数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):44-49. (LIU Yandong,XU Guobin,ZHANG Yazhuo. 3D numerical simulation of hydraulic feature for watercourse including flexible submerged plant[J]. Journal of water resources and water engineering,2014,25(6):44-49(in Chinese)).

[19] 刘诚,沈永明. 水生植物对河道形态影响的三维湍流模型[J]. 水利学报,2010,41(2):127-133. (LIU Cheng,SHEN Yongming. Numerical modeling of alluvial landforms with the impacts of aquatic vegetation[J]. Journal of hydraulic engineering,2010,41(2):127-133(in Chinese)).

[20] 吴梦瑶,张景新. 基于多孔介质模型的有限柱群绕流模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2019,34(4):467-474. (WU Mengyao,ZHANG Jingxin. Numerical simulation of flow around a finite circular array of cylinders using porous media model[J]. Chinese journal of hydrodynamics,2019,34(4):467-474(in Chinese)).

[21] 毛泽魁. 多孔介质森林模型中流场分布特征的研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.

[22] ZONG L J,NEPF H. Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel[J]. Journal of fluid mechanics,2012,691:368-391.

(编辑　黄崇亚)